

**Чудеса инженерии. Бурдж-Дубай**

Дешкович Д.С., Чалей А.Л.

(Научный руководитель – Коледа С.М.)

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь

Бурдж-Дубай (Халифа) был признан самым высоким зданием в мире уже 21 июля 2007 года, хотя открыт он был лишь спустя два с половиной года – в начале 2010. Возведение высочайшего небоскрёба, чем-то напоминающего гигантский сталагмит, началось в 2004 году. Изначально Бурдж-Дубай должен был стать своеобразным "городом в городе", со своими бульварами, лужайками и даже целыми парками, поэтому неудивительно, что изначальный бюджет проекта составил полтора миллиарда долларов, а по завершении строительства цифра оказалась гораздо больше – \$4,1 миллиарда. Автором проекта выступил американский архитектор Эдриан Смит, а генеральным подрядчиком выбрали компанию Samsung. Башня имеет некоторые инженерные особенности, про которые мы и расскажем.

Над песками аравийской пустыни поднимается самое высокое сооружение, созданное человеком на Земле. Город в небесах почти полкилометра высотой. Бурдж-Дубай является вершиной искусства строительства небоскребов. Своим успехам он обязан 7 основополагающим изобретениям.

В основе каждого небоскреба лежит новаторское движение, позволяющее взять инженерам новую высоту.

Дубай растет быстрее любого другого города на Земле. Круглосуточно целые армии строителей работают над созданием места, которым будет восхищаться весь мир. Центром этого грандиозного плана является Бурдж-Дубай. Это результат последнего исторического скачка строительной инженерной мысли.

Для того, чтобы понять, как Бурдж-Дубай может достигать такой высоты, нам нужно вернуться в прошлое, когда только начиналась история небоскребов. Первый прорыв произошел в 19 веке, когда было построено здание высотой всего 43 метра. Инженеры поняли, для того, чтобы строить более высокие здания, людям следует обеспечить подъем на верхние этажи.

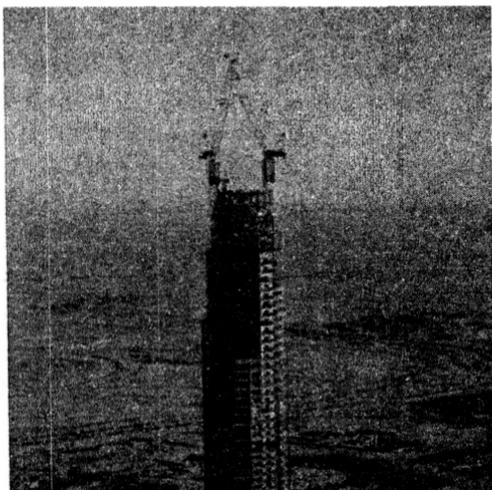


Рисунок 1. Строительство здания Бурдж-Дубай

### **Перемещения!**

У этой проблемы есть очевидное решение – лифт! Но первые лифты имели один смертельный недостаток – они падали, когда рвался трос и ничто не могло их остановить. Но было создано устройство, способное мгновенно остановить лифт. В 1854 г. Это изобретение было продемонстрировано на международной ярмарке в Нью-Йорке. Это был первый в мире автоматический безопасный лифт. Самый ответственный элемент конструкции – трос. Он крепится к кабине через мощную рисорную пластину, соединенную с металлическими отрезками – шипами по обе стороны кабины. Они скользят вдоль направляющих, снабженных зубьями. Обрыв троса влечет за собой цепочку событий. Оставшись без нагрузки пружина сжимается, выталкивает в бок шипы, они зацепляются за зубья направляющих и останавливают кабину. Это было революционным изобретением. В Бурдж-Дубаи идея лифта приобретает экстремальные формы, т.к. здесь более 160 этажей. Высота и масштабы небоскреба требуют от инженеров, разрабатывающих лифты почти невозможного. В Бурдж-Дубаи смогут одновременно находиться 35 тысяч человек – население небольшого города. Чтобы справиться с гигантским потоком людей в Бурдж-Дубаи было запроектировано 53 лифта, некоторые из которых способны развивать скорость

до 35 км/ч и подниматься на 120 этажей менее чем за 50 секунд, самый большой из них вмещает до 46 пассажиров. Остановить такую машину в случае аварии – задача титанической сложности. Как только лифт в Бурдж-Дубай превышает назначенный лимит скорости – включаются аварийные тормоза. Металлические тормозные колодки врезаются в направляющие и развивают тормозящее усилие, достаточное для того, чтобы остановить лифт за несколько метров. Безопасные лифты позволили преодолеть барьер 5-этажей, небоскребы оказались неожиданно перспективным направлением. Однако, когда высота зданий стала приближаться к 80 м, прочности традиционным строительным материалам стало не хватать. Чтобы сделать следующий скачок в высоте, небоскребы пришлось создавать заново.

### Строительные материалы

Камень – не тот материал, из которого следует строить небоскребы. Важнейшее изобретение из всей истории архитектуры – стальной каркас из опор и балок. Сталь гораздо прочнее камня, поэтому каркас может быть тонким и одновременно удерживать вес всего сооружения.

Каркас Бурдж-Дубай сочетает все лучшее, что может быть в стали и камне. В его конструкцию входят более 30 тыс. тонн стали, металл внедрен в искусственный камень – бетон. Усиленный таким образом бетонный костяк здания облачен высокотехнологичные стены-шторы из стекла и металла. Стены крепятся к каркасу Бурдж-Дубай секциями высотой до двух этажей. Панели стен жесткие, а соединения между ними подвижные. Если кто-нибудь в здании передвинет тяжелую мебель к внешней стене, то пол наклонится и стена опустится вниз, но подвижные соединения компенсируют сдвиг. Кроме того подвижные соединения позволяют каждой секции расширяться и сжиматься под действием изменения температуры, когда горячее солнце пустыни обходит небоскреб со всех сторон.

Однако самая суровая сила, которой здание должно противостоять – это ветер пустыни. Стена-шторы для Бурдж-Дубай стоит сотни миллионов долларов, поэтому прежде, чтобы закрепить ее на месте, инженеры испытывают на прочность образцы ее секций. Авиационный двигатель воспроизводит условия пустынной бури. Если конструкция не выдержит ветровых нагрузок, то вероятно, что стена-штора когда-нибудь оторвется и улетит.

Как же помешать Солнцу превратить эту чарующую взор стеклянную башню в гигантскую печь? Сталь вознесла небоскребы до невиданных высот, поскольку стены не должны нести вес здания, теперь архитекторы могут применять в них совсем иные материалы. (Стекло стальные стены наполняют здание светом, но вместе со светом в них проходит и жар.

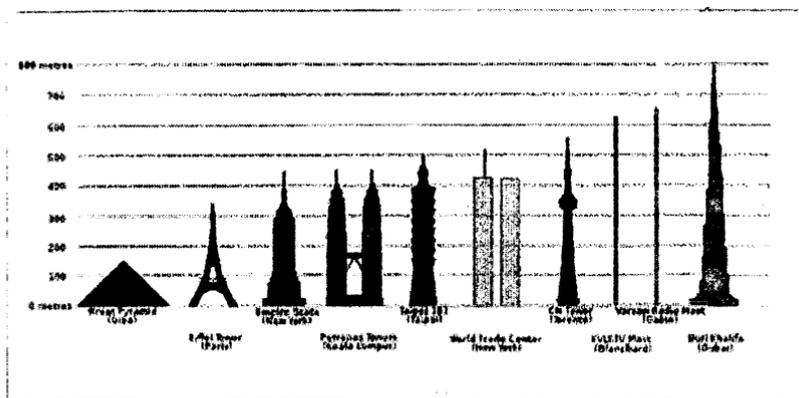


Рисунок 2. Бурдж-Халифа в сравнении

## Температура

Чтобы победить этого врага, необходимо сохранить прохладу в небоскребе. Стекло стальные стены пропускает свет в составе солнечного излучения, большая часть которого поглощается предметами внутри здания, затем эти предметы излучают тепло в окружающий воздух и нагревают его. Поскольку герметично закрытые окна не могут выпустить воздух, атмосфера в здании становится очень быстро некомфортной. Поэтому чтобы стекло стальные небоскребы могли функционировать необходима система искусственного охлаждения. Инженеры решают эту задачу. Они изобретают машину, которая может нагревать, высушивать, охлаждать и увлажнять воздух при помощи воды. С появлением кондиционера окна перестали быть необходимостью. Неожиданно стало возможно строить небоскребы с огромными площадями этажей, поскольку кондиционеры сделали даже самые глубокие помещения пригодными для работы. Все эти достижения обеспечили зданию максимальную окупаемость. На

всей Земле не найдется места, где бы кондиционеры значили бы больше, чем в Дубаи. Температура в тени здесь достигает 40°C, средняя влажность составляет 90%. Это по-истине экстремальные условия для небоскребов. Ключ к тому, чтобы оградить Бурдж-Дубай от жестокого солнца пустыни – одеть здание в стеклянную кожу. Если бы в небоскребе использовали обычное стекло, то не помогли даже самые мощные кондиционеры. У стекла, покрывающего небоскреб, есть внешняя и внутренняя сторона. Внешнее покрытие отражает тепловое излучение Солнца, которое иначе бы проникало в помещение. Внешнее стекло покрыто тонким слоем металла, а этот слой подобно солнцезащитному крему отражает ультрафиолет, который иначе нагревал бы здание, но эта защита бессильна против инфракрасных лучей, которые Солнце посылает в изобилии. Чтобы справиться с ними на внутреннее стекло нанесен тонкий слой серебра. Более 30 тыс. стеклянных панелей – этого количества хватило бы, чтобы покрыть 17 футбольных полей – будут защищать Бурдж-Дубай от палящего зноя.

С увеличением высоты катастрофически увеличивается время строительства. Кран «Кенгуру» является лучшим решением для Бурдж-Дубай. Это кран новаторской конструкции в Австралии, он может поднимать 50 тонн. Как только 3 этажа готовы, происходит нечто удивительное. Основание крана отделяется, поднимается на 3 этажа и фиксируется на новой высоте. Затем на новый уровень поднимается весь кран.

На новый уровень был выведен процесс изготовления блоков. Залогом скорости работы здесь стала новая технология, называемая «заливка в прыгающей форме». Изготовление блока начинается в самом низу. Здесь собирают каркас и клетки, которые станут основой для межэтажных перекрытий и стен Бурдж-Дубай. Краны кенгуру поднимают клетки и помещают их в специальные прыгающие формы. Эти формы заполняются бетоном. Спустя 12 часов, когда бетон застывает, формы готовы к «прыжку». При помощи гидравлических приспособлений формы поднимаются, а бетонный блок находится на месте, всего за 2 часа форма перемещается на следующий уровень и все начинается снова. Т. о. Бурдж-Дубай выкладывается подобно свадебному пирогу из блоков, которые заливаются тут же. Однако по мере того как башня растет бетон, доставлять бетон на верх становится все труднее. Внизу рабочие готовят насо-

сы, лить бетон можно только ночью, т.к. днем слишком жарко – бетон перегреется. Для того чтобы закачать 25 тонн бетона – столько помещается в каждой трубе, на небывалую доселе высоту, нужен насос, мощностью 630 тыс. лошадиных сил. Система нагнетания бетона подвергается невероятному испытанию. Бетон качается на высоту 570 м, что на данный момент является мировым рекордом. В трубе создается чрезвычайно агрессивная среда: высокое давление, частица заполнителя, трущаяся о стенки – за всем этим приходится следить. Раствор может протереть сталь насквозь – тогда трубу разорвет. Бетон достигает 155 этажа за 40 минут.

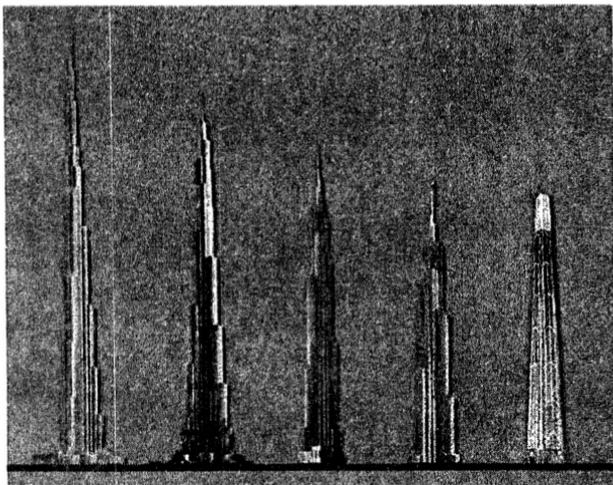


Рисунок 3. Стадии развития проекта Бурдж-Дубай

Помимо грубой машинной силы сюда внесла свой вклад тонкая химическая технология. Окажись раствор слишком жидким – он застывал бы очень долго, что сбilo бы график работ, а оказавшись слишком густым – он бы схватился раньше времени и закупорил трубу. Поэтому для строительства самой высокой башни на Земле использовался бетон "Нурайс". Секрет его кроется в следующем. В раствор бетона добавляются шарики из искусственного льда, которые тают не сразу, а только тогда, когда бетон успевает схватиться. После этого шарики начинают таять внутри застывшего бетона, но это его еще больше укрепляет. Такой бетон обладает не только хорошей прочностью, но и сохраняет тепло.

## Ветростойкость

Проектирование такого небоскреба как Бурдж-Дубай с традиционным внутренним стальным каркасом оказывается сопряженным с огромными трудностями. Чем выше стальной каркас, тем больше он уваливается под сильными ветрами. Скорости порывов, налетающих со стороны Мичиган, достигают 80 км/ч. Ударяя в небоскреб, ветер раскачивает его так, что на верхних этажах осуществляется самая настоящая качка. Раскачивание высотного дома напоминает качку на корабле, что вызывает морскую болезнь. Чтобы избежать этого эффекта, необходимо уменьшить амплитуду колебаний. При построении башни Сирс, инженеры изобретают технологию, позволяющую справиться с ветром. Они выносят каркас наружу, так, что здание приобретает внешний скелет. Поэтому наклонить его ветру будет очень тяжело. Но Бурдж-Дубай в 2 раза выше башни Сирс. При такой высоте жесткий внешний скелет уже не сможет достаточно эффективно противостоять ветру. Чтобы избавить обитателей высотки от морской болезни, архитекторы обращаются к аэродинамическим решениям самого продвинутого уровня. Проектируя здание, его модель продували в аэродинамической трубе, которая была неотъемлемым элементом процесса разработки проекта.

Ветер, мчащийся с огромной скоростью, может быть чрезвычайно опасен для небоскреба. Поток воздуха, обтекающий здание образует мини-смерчи, вихри. Возникающие при этом области низкого давления тянут здание в стороны. Чем выше здание, тем более опасными становятся эти вихри. Огромные силы, которые они порождают, перпендикулярны направлению ветра, поэтому если здание упадет от ветра, то, скорее всего оно упадет не по ветру, а в сторону. Вместо того чтобы бороться с ветром, проектировщики ушли от плоских и прямоугольных форм и обратились к более непредсказуемым. Секции башни спроектированы так, чтобы отклонять ветер в разные стороны – это разрушает мощь вихрей и не дает ветру захватить здание. Обдувая здание, ветер никогда не образует единого потока.

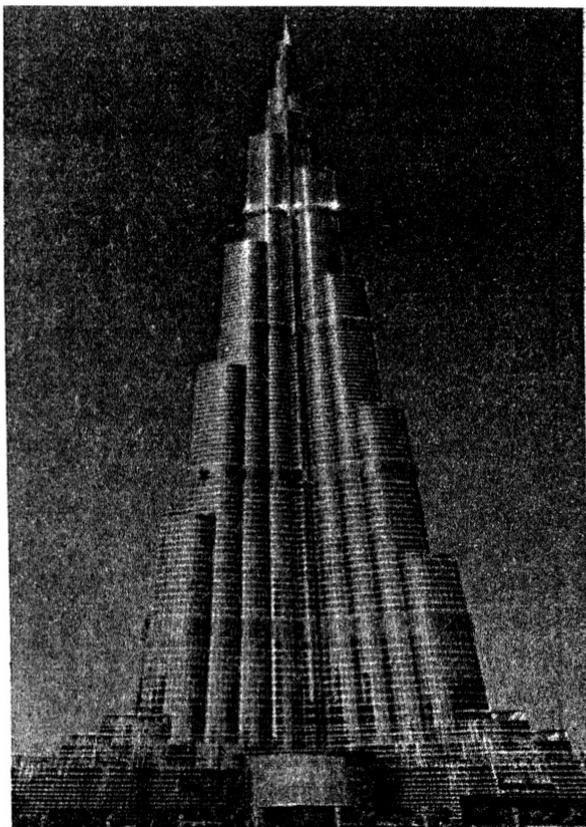


Рисунок 4. Окончательный проект Бурдж-Дубай

### **Землетрясения**

Бурдж-Дубай может выдерживать землетрясения магнитудой до 6 баллов по шкале Рихтера, благодаря своему массивному железобетонному каркасу. Однако здесь перед инженерами возникла еще одна проблема. Чтобы возвести сверхвысокое здание над песками пустыни, нужны особые подходы. На месте строительства Бурдж-Дубая скальная порода залегает недалеко, но она очень плохого качества – она очень хрупкая, в ней много трещин. Потому пришлось бурить на 50 м вниз, чтобы увеличить прочность породы, способную держать все здание. Бурить породу здесь может быть и тяжело,

но настоящие трудности возникают после извлечения бура. Порода под Бурдж-Дубай хрупкая и насыщенная грунтовыми водами. Поэтому крупная скважина сразу начинает обваливаться. Чтобы избежать этого, инженеры заполняют скважину жидкой полимерной смолой, которая вытесняет воду и обломки породы к краям, оставляя центр скважины свободным. Полимерная смола состоит из очень длинных молекулярных цепочек, вступая в контакт с водой, она образует очень длинные волокна. Вязкость предотвращает обрушение скважин. Этот полимер плотнее воды, но легче бетона. Бетон вытесняет смолу и застывает, образуя сваи фундамента. 200 свай, образующие единую систему, не дают уйти зданию под землю. Здание осело лишь на 30 мм, что очень мало для такой его высоты.

### Эвакуация

Чем выше здание, тем больший путь для эвакуации нужно проделать людям. Бурдж-Дубай огнестоек, поскольку огнестоек его железобетонный костяк. В этом здании предусмотрено 9 специальных помещений-огнеубежищ. Они защищены слоями железобетона и листовых огнеупорных покрытий. Их стены способны выдерживать натиск огня в течение 2 часов. Каждое из этих помещений оборудовано специальной системой, подающей в них воздух по огнеупорным трубам. Герметичные огнеупорные двери предотвращают проникновение дыма. В огнеубежищах люди могут скрываться до тех пор, пока аварийные службы не возьмут ситуацию под контроль. Огнеубежища расположены приблизительно через каждые 30 этажей, что делает их относительно легкодоступными для всех. Исключить фактор задымления позволяет предотвратит технология, разработанная в Бурдж-Дубай. Система раннего предупреждения работает непрерывно круглые сутки. Как только срабатывает детектор дыма, термодатчик или автоматический водный огнетушитель, в действие вступает мощная система вентиляторов. Они нагнетают чистый прохладный воздух в здание по воздуховодам. Свежий воздух вытесняет дым из лестничных шахт, гарантируя проходимость путей эвакуации. Это и есть система пожарной безопасности, отвечающая небоскребу 21 века.

Стоящий на плечах прежних исторических чудес инженерии, Бурдж-Дубай является величайшим небоскребом мира.